

**МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ
ИЗ ИОНОГРАММ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Н.П. Данилкин, М.Ю. Филиппов

**METHODS OF EXTRACT OF ADDITIONAL INFORMATION FROM
THE VERTICAL SOUNDING IONOGRAMS**

N.P. Danilkin, M.Y. Filippov

На ионограммах вертикального радиозондирования ионосферы присутствует область ненаблюдаемой ионизации D-области ионосферы, где определение профиля электронной концентрации затруднено. Однако существуют способы ограничения числа возможных решений распределения электронной концентрации с использованием в том числе информации о поглощении радиоволн. В настоящий момент алгоритм определения поглощения по данным одной ионограммы проходит соответствующую проверку.

Ionograms of the ionosphere vertical radio sounding show the region of non-observed ionization in D-layer. In this region, determining the electron concentration profile is difficult. However, there are ways to reduce the number of possible solutions for the electron concentration with the use of information on radio wave absorption. At present, the algorithm of absorption determination from one ionogram data is under testing.

Распределение электронной концентрации в D-области ионосферы не поддается расчету итерационными методами обращения высотно-частотно зависимостей, так как отсутствуют эхосигналы на частотах, соответствующих малой ионизации. Поэтому требуется метод, основанный на других доступных источниках информации. В литературе описан метод [Данилкин, Денисенко, 1973], использующий в качестве входных данных значения поглощения, действующей высоты отражения E-слоя на частотах, близких f_{min} , и полагающий закон распределения электронной концентрации параметризованную экспоненту.

В настоящий момент широко распространены ионозонды вертикального радиозондирования, на ионограммах которых могут быть непосредственным образом получены все величины, необходимые для определения профиля $N_e(h)$ в D-области указанным выше методом, кроме поглощения радиоволн. Таким образом, встает проблема регулярных измерений поглощения.

В современных ионозондах [Zabotin et al., 2006] среди регистрируемых параметров цифровых ионограмм присутствуют амплитуды эхосигналов отраженных от ионосферы радиоволн (рис. 1).

Классический импульсный метод расчета коэффициента отражения от ионосферы A_1 основан на сравнении амплитуд кратных отражений [Rawer, 1956; Альперт, 1962]:

$$\rho = \frac{2R_2}{R_1 \rho_{\text{Земли}}}$$

При этом коэффициент отражения земли полагают равным единице, а поглощение рассчитывается по формуле:

$$L = -8.7 \ln \rho = -8.7 \ln \frac{2R_2}{R_1}$$

Кратные отражения от E-слоя наблюдаются далеко не всегда, и для того чтобы определять поглощение, используя только R_1 , обыкновенно вводят постоянную аппаратуры, определяемую как отраженную на действующей высоте h напряженность поля R

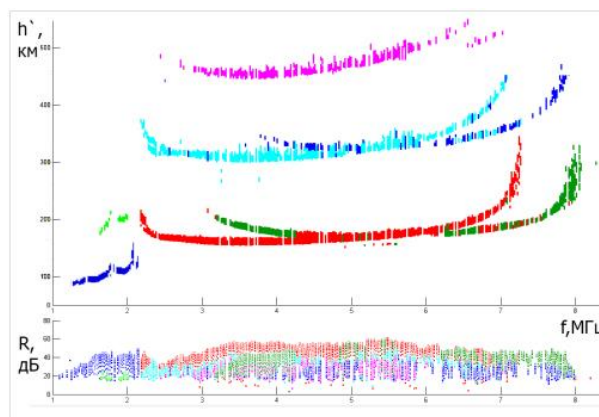


Рис. 1. Ионограмма ионозонда «Парус-А», в нижней части рисунка приведены величины амплитуд отраженных сигналов в децибелах (по аналогии с стандартным представлением диназонда [Zabotin et al., 2006]). Цвета соответствуют слоям E, F, их кратным отражениям и магнитоионным компонентам.

в отсутствие поглощения [Флигель, 1963]:

$$G_0 = Rh = const.$$

Для конкретных значений R_1 , h_0 и коэффициента отражения от ионосферы ρ :

$$G_0 = \frac{R_1 h_0}{\rho}$$

При наличии двух кратных отражений постоянная аппаратуры равна

$$G_0 = \frac{R_1 h_0}{\rho} = \frac{R_1^2 h_0}{2R_2}$$

Коэффициент отражения:

$$\rho = \frac{R_1 h_0}{G_0}$$

Поглощение:

$$L = -8.7 \ln \rho = 8.7 \ln G_0 - 8.7 \ln(R_1 h_0)$$

Используя значение $\max_{\text{time}} G_0$ (исторический максимум за продолжительный период), рассчитываем поглощение $L(f)$ для каждой пары $R_1(f)$ и $h(f)$.

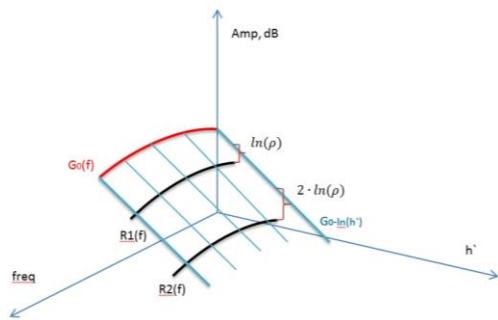


Рис. 2. Графическое представление методики: R_1 , R_2 – амплитуды первого и второго кратных отражений, G_0 – постоянная аппаратуры, $G_0(f)$ – функция аппаратуры.

После проверки по критерию χ^2 соответствия выборки $L(f)$ нормальному закону распределения, в случае выполнения критерия получаемое математическое ожидание величины поглощения будем считать искомой величиной.

$$L = 8.7 \ln(\max_{\text{time}} G_0) - 8.7 \ln(\overline{R_1(f)h_0(f)}).$$

Данное значение поглощения является искусственной заменой «традиционного» поглощения радиоволн, распространяющихся в ионосфере, определяемого стандартными методами, и соотношения этих величин являются почвой для дальнейших исследований.

Отметим, что используемая методика определения поглощения лишена недостатка, присущего описанному выше методу А1, заключающегося в том, что коэффициент отражения земли, полагаемый $\rho_3=1$, может не соответствовать действительности [Флигель, 1963] и этим вносить в расчеты значительную ошибку (более 10 дБ при $\rho_3 < 0.5$).

Эквивалентная рабочая частота $f_{\text{раб}}$, на которой происходит накопление среднего значения амплитуд в методе А1, может быть определена формально с известной погрешностью внутри частотного размаха имеющих на конкретной ионограмме эхосигналов слоя Е и является переменной величиной в течение суток. Это происходит в силу неоднозначности обратного перехода от математического ожидания $L(f)$ к значению частоты, а также по причине невозможности измерения амплитуд в течение дня на фиксированных частотах из-за отсутствия на ионограммах эхосигналов, например, утром $f_0E < 2$ МГц, а днем $f_{\text{min}} > 2$ МГц.

Взамен постоянной аппаратуры G_0 в ближайшее время будет введена аналогичная зависимость от частоты – функция аппаратуры $G_0(f)$ – тогда можно будет более строго говорить о рабочей частоте. Однако это не снимет ограничений, связанных с наличием эхосигналов слоя Е в окрестности частот, интересующих возможного потребителя.

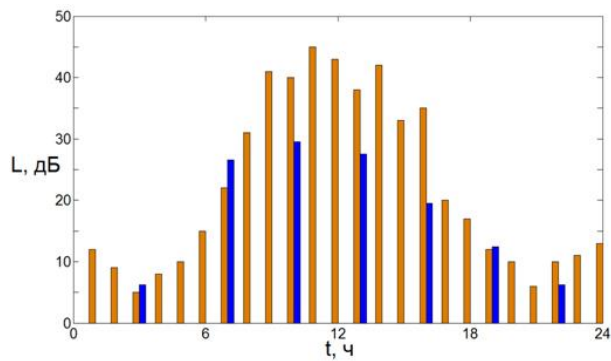


Рис. 3. Суточный ход поглощения по данным станции ИЗМИРАН для равноденствия. Оранжевые прямоугольники соответствуют методу А1 (1961 г.), синие – предлагаемому методу (2012 г.).

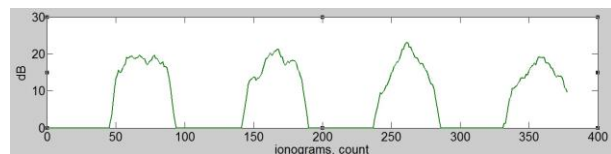


Рис. 4. График суточных ходов поглощения. По оси абсцисс – ионограммы (интервал между соседними ионограммами 15 мин).

Одними из возможных критериев пригодности к дальнейшему использованию получаемых в описанной методике величин является построение сезонных вариаций поглощения, а также сравнение суточного хода поглощения с методом А1 за аналогичный период. Такое сравнение представлено на рис. 3.

Аналогичные картины суточных ходов (рис. 4) можно получать для любых периодов времени в рамках базы данных ионограмм «Парус-А» в ИПГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Альперт Я.Л. Распространение радиоволн и ионосфера. Изд-во АН СССР, 1960. 479 с.
 Данилкин Н.П., Денисенко П.Ф. Номограммы для расчета модельного $N(h)$ -профиля в D-области ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. 1973. Т. XIII, № 5. С. 927–929.
 Флигель М.Д. Географическое распределение поглощения радиоволн в ионосфере: Дисс. ... к.ф.-м.н. М., 1963.
 Rawer K. Manual on ionospheric absorption measurements / WDCA. Rep. UAG-057. Boulder, 1976. 202 p.
 Zaboltn N.A., Wright J.W., Zhbankov G.A. NeXtYZ: Three-dimensional electron density inversion for dynasonde ionograms // Radio Sci. 2006. V. 41. RS6S32. doi:10.1029/2005RS003352.

Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова, Москва, Россия